

特殊センサー・マイクロ波画像装置 (SSM/I) による土壌水分の長期観測手法の開発

DEVELOPMENT OF A SPECIAL SENSOR MICROWAVE IMAGER (SSM/I)
ALGORITHM FOR LONG-TERM MONITORING OF SOIL MOISTURE

太田 哲¹・小池俊雄²・Hui LU³・David N. KURIA⁴・筒井浩行¹・Tobias GRAF⁵
開発一郎⁶・Gombo DAVAA⁷・松浦直人⁸

Tetsu OHTA, Toshio KOIKE, Hui LU, David N. KURIA, Hiroyuki TSUTSUI, Tobias GRAF,
Ichiro KAIHOTSU, Gombo DAVAA and Naoto MATSUURA

¹正会員 工修 東京大学科学技術振興特任研究員 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 工博 東京大学産学官連携研究員 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁴非会員 工修 東京大学大学院博士課程 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁵正会員 工博 東京大学産学官連携研究員 地球観測データ統合連携研究機構 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁶正会員 理博 広島大学教授 大学院総合科学研究科 (〒739-8521 広島県東広島市鏡山1-7-1)

⁷Ph. D., Head of Hydrology Section, Institute of Meteorology and Hydrology (Khudaldaany Gudamj-5, Ulaanbaatar 210646, Mongolia)

⁸非会員 修士 宇宙航空研究開発機構計画マネージャ 地球観測研究センター (〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1)

Soil moisture is one of the key parameters of land-atmosphere interaction, which affect the seasonal and inter-annual variations of the global and regional water cycle considerably. To find out a long-term trend of this parameter, a Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) algorithm is proposed in this paper by extending an Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) algorithm. A microwave brightness temperature which was obtained by SSM/I is calibrated to fill in gaps of models.

Although there is disadvantage to estimate soil moisture using SSM/I data, accuracy equal to AMSR-E was obtained through an algorithm validation in the Mongolia reference site of the Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP), and a trend of this site was found out by applying the algorithm to the long-term SSM/I data.

Keywords : Remote sensing, Soil moisture, Microwave, SSM/I

1. はじめに

地球規模の水・エネルギー循環に大きな影響を与える要素の一つである土壌水分量の推定は、長期的な気候変動を把握する上で重要な課題である。土壌水分量のグローバルな情報収集には衛星の利用が不可欠で、衛星搭載型マイクロ波放射計を用いた土壌水分算定アルゴリズムが開発されてきている。とりわけ、2002年に打ち上げられた2機の高性能マイクロ波放射計(AMSR/AMSR-E)により、低周波数帯(6.9GHz)データの利用が可能となり、衛

星による土壌水分観測の精度は向上した。また、今後も低周波数帯での観測が可能な衛星の打ち上げが計画されている。しかし、温暖化等に伴い土壌水分が気候学的にどのように変化しているかを捉えようとした場合、これらの近年のデータだけでは必ずしも十分とは言えない。

そこで、1987年に打ち上げられ現在でも後継機が運用されている特殊センサー・マイクロ波画像装置(SSM/I)のデータの利用を考える。これまでSSM/Iによる陸面水文観測への適用研究が進められてきたが、SSM/Iの19, 37, 89GHzの周波数では土壌水分に対する感度が十分得られないことや植生の影響を受けやすいなど、土壌水分



写真-1 東京大学農場の2台のマイクロ波放射計



写真-2 粗度造形器

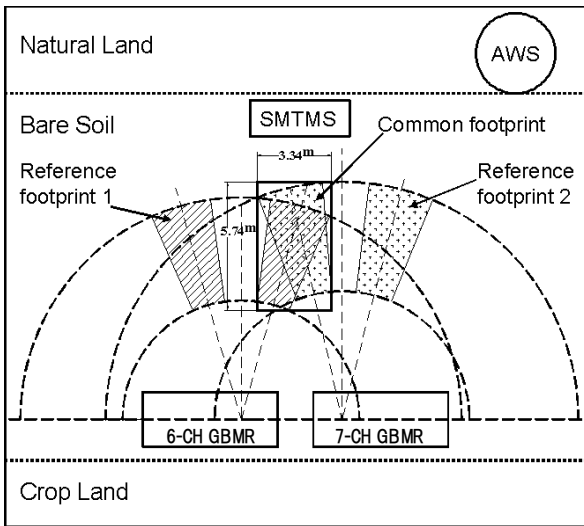


図-1 東京大学農場の観測領域の概要

を精度良く算定するのは困難とされてきた。一方で、AMSR/AMSR-Eの土壤水分観測手法の開発により、これまで乾燥土壌で過大評価となっていた現象が物理モデルによって表現できるようになってきた¹⁾など、低周波数帯を使った土壤水分算定手法は発展を遂げてきた。これらの成果をSSM/Iの周波数帯に拡張させることにより、SSM/Iでも精度の良い算定が可能となることが期待される。

本研究では、AMSR/AMSR-Eの土壤水分観測手法の開発の中で行われた精緻な地上観測実験の成果をSSM/Iの周波数帯に応用し、2003年にモンゴルにて得られた衛星同期観測データを用いて比較・検証することにより、SSM/Iによる土壤水分の長期観測手法を開発する。さらに、1988～1999年のSSM/Iデータに適用し、モンゴルの地上検証サイトにおける土壤水分の長期的な傾向の抽出を試みる。

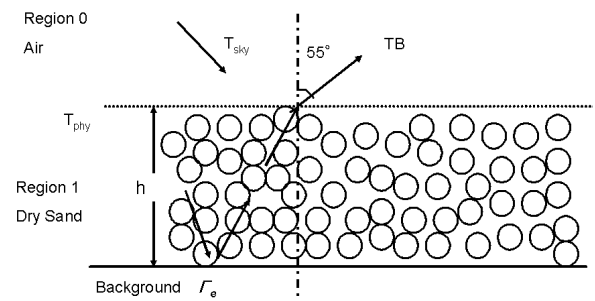


図-2 放射伝達モデルの幾何学的な構成

2. 研究方法

(1) AMSR/AMSR-Eアルゴリズム

a) 地上観測実験

マイクロ波の放射伝達特性を詳しく理解するために、AMSR/AMSR-Eと同様の性能を持つ地上設置型マイクロ波放射計(GBMR)を用い、砂層を対象として、その厚さや含水量、砂層の下層境界条件を変化させて観測実験を実施した。写真-1や図-1は観測実験の概要を表しており、東京大学農場(西東京市)の実験圃場に2台のGBMRを設置し、両放射計の共通の観測フットプリントをターゲット領域とし、ここに金属板もしくは電波吸収材を敷き、その上に観測対象である砂層を築いた。その両隣はそれぞれの放射計の参照地面とした。土壤水分と地温は6本のTDRと10本の白金センサを用いて、鉛直、空間分布を計測し、地表面温度は赤外温度計を用いて計測した。実験時には土壤のサンプリングを行い、土壤水分と土壤密度を計測した。また、地表面粗度の影響を詳しく調べるために、写真-2に示す規則的な矩形断面を有する粗度造形器を製作し、放射計の観測方向に対して垂直もしくは平

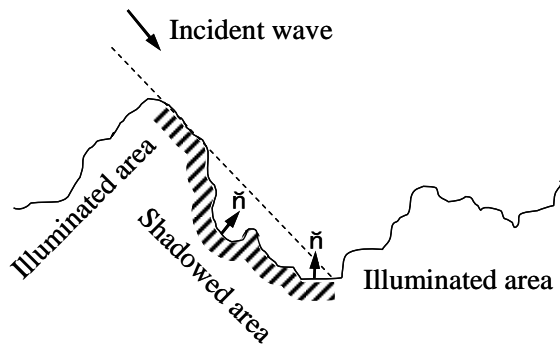


図-3 Shadowing効果

行になるように砂層表面に凹凸の縞模様を造形し、そのサイズを変化させて観測実験を実施した。これらの観測実験を経てモデル開発が行われた。

b) モデル開発

砂層は図-2にあるように多くの球形粒子が密に詰められたスラブ構造としてモデル化された。砂層を均一な媒体と仮定すると、放射伝達モデルは次式のように表現できる²⁾。

$$\mu \frac{d}{d\tau} \begin{bmatrix} I_V(\tau, \mu) \\ I_H(\tau, \mu) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_V(\tau, \mu) \\ I_H(\tau, \mu) \end{bmatrix} - (1 - \omega_0) B(\tau) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{\omega_0}{2} \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} P_{VV} & P_{VH} \\ P_{HV} & P_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_V(\tau, \mu') \\ I_H(\tau, \mu') \end{bmatrix} d\mu' \quad (1)$$

ここで、 μ は観測角の余弦、 μ' は散乱体への入射角の余弦、 τ は光学的厚さ、 I_p ($p: V$ or H) は放射強度、 ω_0 は単一散乱アルベド、 B はPlankの放射則、 P_{ij} ($i, j: V$ or H) は散乱位相関数である。

式(1)については、離散的な手法³⁾とHenyey-Greenstein位相関数を用いることによって効率よく解を得ることができる。土壌粒子の体積散乱の計算には稠密媒体の放射伝達モデル(DMRT)を、表面散乱にはAIEMモデルを用いた。また、図-3にあるように観測角によって生じる陰が引き起こす地表面反射率の低下(Shadowing効果)を地表面粗度と関連付けて表面散乱モデルに取り入れた。

c) SSM/I観測周波数への応用

モンゴルでの衛星同期観測データ(土壌水分、地温、SSM/I観測輝度温度のマッチアップデータ)を用い、土壌水分と地温をモデルに入れて輝度温度を算出し、SSM/I観測輝度温度に最も合うようにA3観測点(図-4)についてパラメータ調整を行った。その結果、地表面粗度パラメータについてはRMS高さ4.6mm、相関長さ10.3mm、土粒子径については19GHzで16.8mm、37GHzで8.3mmを得た。これらの条件で、土壌水分(体積含水率)を1%刻みで0~20%、地温を1K刻みで270~320Kの範囲についてモデル計算を行った。SSM/Iの土壌水分算定アルゴリズム

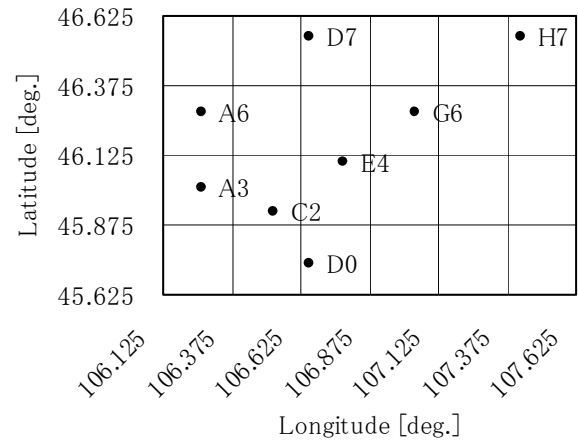


図-4 モンゴルの地上観測点とSSM/Iデータピクセルの位置関係

開発では、ここで決まったパラメータは変更せず、SSM/I観測輝度温度を微調整することによって最適化することとした。

(2) SSM/Iアルゴリズム

a) 輝度温度補正

前節ではA3観測点についてフィッティングを行った。ここでは、図-4に示したモンゴルの8か所の観測点について観測輝度温度を微調整することによってフィッティングする。まず、積雪と植生の影響が少ないデータでフィッティングすることを考え、対象とする時期を5月に限定した。次に、SSM/I観測輝度温度とモデルの輝度温度のそれぞれについて8地点の平均をとり、両者が最も合うようにSSM/I観測輝度温度を補正した。補正量は19GHz-Vが $-7K$ 、19GHz-Hが $-8K$ 、37GHz-Vが $-2K$ 、37GHz-Hが $0K$ となった。

b) 植生層放射伝達モデル

土壌水分算定で用いる低い周波数領域のマイクロ波放射伝達では、大気の影響はほとんど無視できるため、衛星で観測されるマイクロ波放射輝度温度 T_{bp} は、植生の影響も含めて次式のように表すことができる⁴⁾。

$$T_{bp} = T_{bsp} \cdot e^{-\tau_c} + (1 - \omega_c)(1 - e^{-\tau_c})T_c \quad (2)$$

ここで添え字 p は偏波を表し、 T_{bsp} は地表面から放射されるマイクロ波輝度温度で、本研究におけるAMSR/AMSR-Eアルゴリズムからのモデル結果がここに入る。 τ_c 、 ω_c 、 T_c はそれぞれ植生層の光学的厚さ、単一散乱アルベド、物理温度である。式(2)の右辺第1項は植生層によって消散される地表面からの放射を表し、第2項は植生層自体からの上向き放射を表している。

植生層の光学的厚さ τ_c と単一散乱アルベド ω_c は、厳密には植生の形態やその分布、空間個数密度、植生含

水量などの多くのパラメータによって定まるが、既往の研究では τ_c は観測波長 λ と植生含水量 W_c の関数として次式で与えられている⁵⁾。

$$\tau_c = \frac{b' \lambda^\chi \cdot W_c}{\cos \theta} \quad (3)$$

ここで θ は観測角を表し、 b' (=9.32) と χ (=−1.38) は2002年米国アイオワ州で実施された土壌水分観測プロジェクトSMEX02の大豆畑における結果を用いた。一方、 ω_c についても上記実験で得られているが、AMSR/AMSR-Eの観測周波数に対応した値であるため、本研究では0と仮定した。

c) 逆解析手法

放射伝達方程式はすべてのパラメータが与えられて放射輝度温度を求める式である。これを用いて衛星観測輝度温度から土壌水分を推定するためには、逆解析手法を導入する必要がある。

未知数は土壌水分、植生含水量、地表面物理温度、植生層物理温度の4つであるが、地表面と植生層の物理温度が等しいと仮定することにより、未知数を3つに減らすことができる。これにより、周波数や偏波の異なる3種類の観測輝度温度を用いて定式化することが可能となる。さらに、地表面温度の効果を取り除くために偏波指標(PI)と土壌水分指標(ISW)を導入し、未知数を土壌水分と植生含水量の2つに減らすことができ、2元連立方程式を解くことでこれらを求めることができる⁴⁾。

d) 偏波指標(PI)⁶⁾

地表面からのマイクロ波放射が植生層で消散されることでV偏波とH偏波の輝度温度の差が小さくなることに着目した、植生層の効果を表す指標で、両偏波間の差を平均値で除することで物理温度の影響を取り除いている。

$$PI = \frac{T_{bV} - T_{bH}}{\frac{1}{2}(T_{bV} + T_{bH})} \quad (4)$$

一般に土壌水分が多くなると両偏波間の輝度温度の差は大きくなるため、PIは土壌水分の指標ともなる。

e) 土壌水分指標(ISW)⁷⁾

水の誘電率の周波数依存性により、土壌水分が多くなるにつれて2つの周波数間の輝度温度の差が大きくなることに着目した指標で、2つの周波数間の差を平均値で除することで物理温度の影響を取り除いている。

$$ISW = \frac{T_{bi} - T_{bj}}{\frac{1}{2}(T_{bi} + T_{bj})} \quad (5)$$

ここで添え字 i 、 j は観測周波数 ($i > j$) を表している。

f) ルックアップテーブル

放射伝達モデルの数値計算により、ある土壌水分とある植生含水量に対応する放射輝度温度を各周波数、各偏

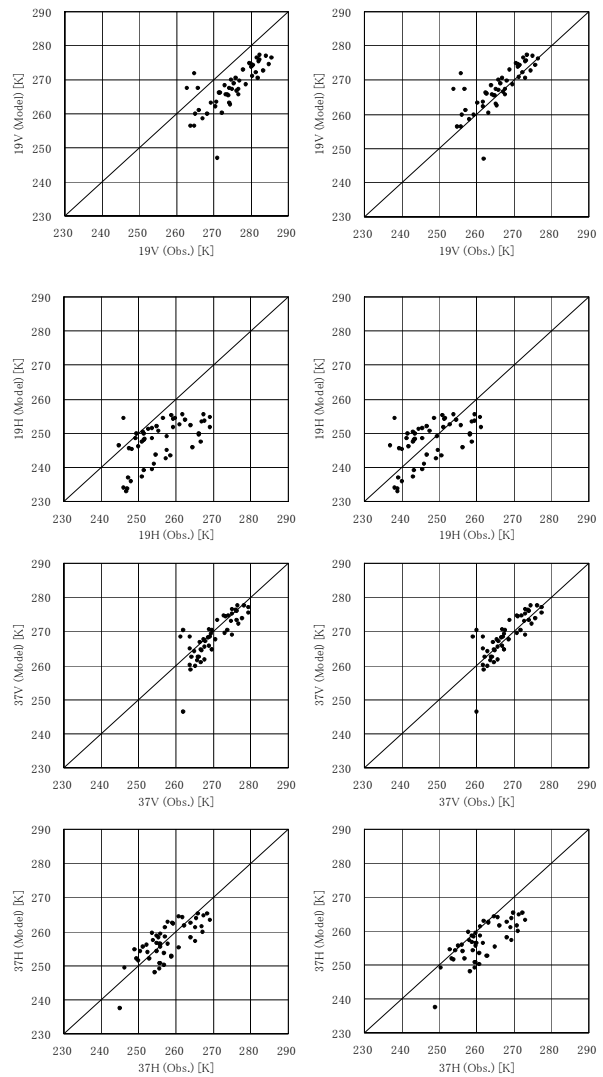


図-5 輝度温度補正 (左:補正なし, 右:最終補正)

表-1 観測輝度温度の補正量

	最適化の段階	
	輝度温度	土壌水分
19GHz-V	-7K	-9K
19GHz-H	-8K	-8K
37GHz-V	-2K	-2K
37GHz-H	0K	+4K

波について求め、PIおよびISWを計算する。様々な土壌水分、植生含水量の組合せについて計算することにより、土壌水分と植生含水量からPIとISWを指し示すテーブルが出来上がる。これを補間しながら逆変換し、PIとISWから土壌水分と植生含水量を指し示すテーブルを作成する。これをルックアップテーブルと呼ぶ。衛星観測輝度温度からPIとISWを計算し、ルックアップテーブルを参

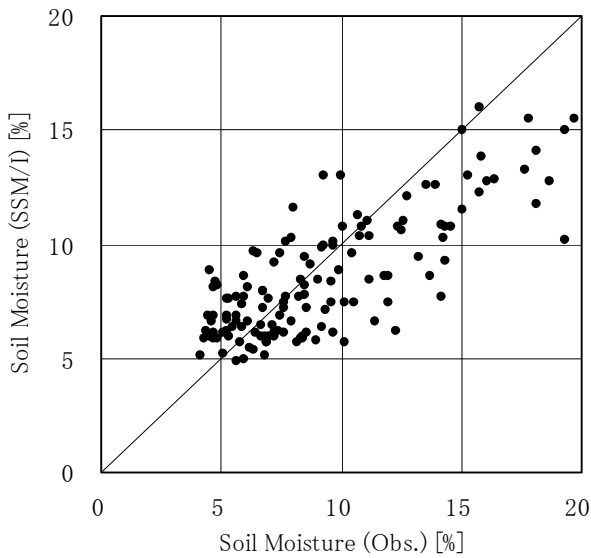


図-6 土壌水分推定結果

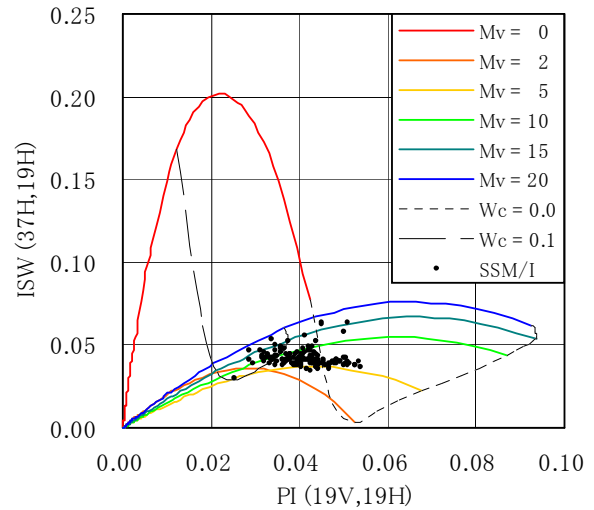


図-8 PI-ISWプロット図

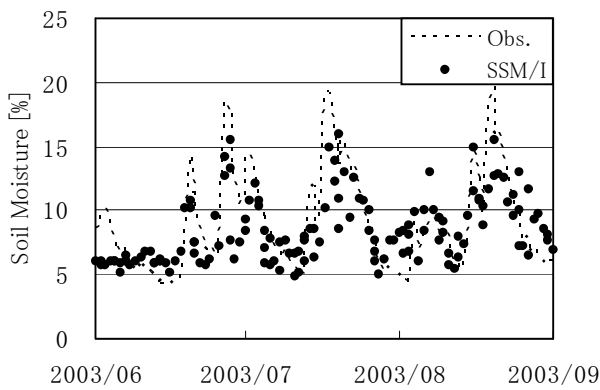


図-7 土壌水分推定結果 (時系列)

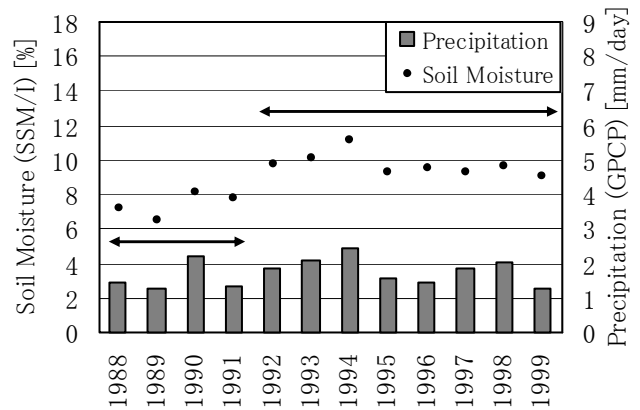


図-9 検証サイトを含む2.5度四方の領域の長期適用結果

照することで土壌水分と植生含水量を推定することができる。本研究では、PIの計算に19GHzのV偏波とH偏波を、ISWの計算に37GHzのH偏波と19GHzのH偏波を用いることとした。

g) アルゴリズムの調整

以上で、衛星観測輝度温度から土壌水分の推定が可能となったが、その推定結果が地上観測の土壌水分に合うように観測輝度温度を微調整する必要がある。再びモンゴルでの衛星同期観測データを用いて、8地点で領域平均した土壌水分で比較した。地上観測の土壌水分は、水分が凍ることにより正しく観測されないことがあるため、6,7,8月(JJA)のデータを対象とした。輝度温度の最終的な微調整の結果を図-5および表-1に示す。

3. 結果と考察

(1) アルゴリズムの検証

前章の輝度温度補正量を用いて推定した土壌水分の結果を図-6, 7に、ルックアップテーブルのカバー状況を図-8に示す。

地上観測値と推定値の差の絶対値の平均は2.00% (単位の%は体積含水率) で、RMS誤差は2.55% (同) であった。小池ら¹⁾はモンゴルの12地点のデータを用いてAMSR-Eの土壌水分アルゴリズム検証を2002年7~9月について実施し、地上観測値と推定値の差の絶対値の平均が2.98% (同) の結果を得ている。なお、RMS誤差については記述されていない。条件は異なるが、SSM/Iによる推定精度は当該地域においてAMSR-Eと同等である可能性が

示された。

図-6にあるように、土壌水分が低い領域では比較的に合っているが、土壌水分が高い領域では過小評価となっている。これは、輝度温度の補正の際に傾斜を付ける（輝度温度に応じた補正量を与える）などで改善する可能性はあるが、本質的には放射伝達モデルで十分に表現できていない点があると考え、今後の検討課題とする。

(2) モンゴル地上検証サイトにおける長期適用

近年の気候変動による当該地域の土壌水分の長期的な変動傾向を明らかにするため、検証サイトを含んだ2.5度四方の領域について、対象の12年間の6,7,8月(JJA)の平均土壌水分量を算出し、その長期変動傾向を検討した。図-9にあるように、1988~1991年の比較的乾燥した期間のあと湿潤化した定常的な期間が続いていることが示された。Endo *et al.*⁸⁾は、モンゴル全体の1960~1998年の降水データを分析して、日雨量が0.1mm以上の'wet day'の日数が当該地域で20%増加していることを示している。対象期間が一致しているわけではないが、本研究で示された土壌水分に関する変化傾向は、降水の長期変動傾向と同傾向であることが分かる。また、全球降水気候計画(GPCP)の降水データを用いて、一致するグリッドのJJA平均と比較すると、湿潤化傾向は見られないが、年々変動の傾向はほぼ一致していることが分かる。

4. 結論

本研究より以下の結果を得た。

- 1) AMSR/AMSR-EアルゴリズムをSSM/Iに拡張し、観測輝度温度を簡便な方法で補正するSSM/Iアルゴリズムが提案された。
- 2) 本研究で提案されたSSM/Iアルゴリズムをモンゴルにて得られた衛星同期観測データを用いて検証した結果、土壌水分の算定精度が当該地域においてAMSR-Eと同等である可能性が示された。
- 3) SSM/Iの1988~1999年の長期データセットを用いてモンゴル地上検証サイト周辺2.5度四方の領域について土壌水分の変動を調べた結果、1991年までの比較的乾燥した期間のあと湿潤化した定常的な期間が続いていることが示された。

謝辞：本研究で得られたモンゴルの土壌水分の長期的な変動傾向の抽出に関する成果は、環境省地球環境研究総

合推進費H16地球環境問題対応型研究課題「北東アジアにおける砂漠化アセスメント及び早期警戒体制(EWS)構築のためのパイロットスタディ」(G-2)(代表 武内和彦)によるものである。また、乾燥条件下における土層および植生層でのマイクロ波放射伝達過程に関するフィールド観測と検証、数値シミュレーション研究は、科学技術振興調整費重点課題解決型研究「地球観測データ統合・情報融合基盤技術の開発」(代表 柴崎亮介)の支援の下で実施されている。また、観測実験に当たっては、東京大学大学院農学生命科学研究科附属農場観測フィールド米川助教授、久保田技官を始め多くの方々のご協力を得た。ここに記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 小池俊雄, 中村佳照, 開発一郎, Gombo Davaa, 松浦直人, 玉川勝徳, 藤井秀幸: 改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)による土壌水分・植生水分観測手法の開発, 水工学論文集, Vol. 48, pp. 217-222, 2004.
- 2) Tsang, L. and Kong, J.A.: Theory of thermal microwave emission from a bounded medium containing spherical scatters, *Journal of Applied Physics*, Vol.48, pp.3593-3599, 1977.
- 3) Liu, G.: A Fast and Accurate Model for Microwave Radiance Calculations, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.76, No.2, pp.335-343, 1998.
- 4) 小池俊雄, 下茂 力, 太田 哲, 藤井秀幸, 柴田 彰: 陸面水文量分布のグローバル推定のためのマイクロ波放射計アルゴリズムの開発と検証, 水工学論文集, Vol. 44, pp. 247-252, 2000.
- 5) Jackson, T.J., Schmugge, T.J.: Vegetation Effect on the Microwave Emission of Soils, *Remote Sensing of Environment*, Vol.36, pp.203-212, 1991.
- 6) Paloscia, S., Pampaloni, P.: Microwave Polarization Index for Monitoring Vegetation Growth, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.26, No.5, pp.617-621, 1998.
- 7) Koike, T. *et al.*: Spatial and Seasonal Distribution of Surface Wetness Derived from Satellite Data, *Proceeding of the International Workshop on Macro-Scale Hydrological Modeling*, pp.87-90, 1996.
- 8) Endo, N., Kadota, T., Matsumoto, K., Ailikun, B. and Yasunari, T.: Climatology and Trends in Summer Precipitation Characteristics in Mongolia for the Period 1960-98, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.84, No.3, pp.543-551, 2006.

(2006. 9. 30受付)